

Andrzej BOBOŃ
Jan KAPINOS
Jerzy KUDŁA
Władysław MIZIA

ZASTOSOWANIE METODY NIESYMETRYCZNEGO ZASILANIA DO WYZNACZANIA STRAT DODATKOWYCH OBCIĄŻENIOWYCH W SILNIKU INDUKCYJNYM

Streszczenie. Przedstawiono metodę pomiaru strat dodatkowych obciążeniowych przy wykorzystaniu niesymetrycznego zasilania silnika indukcyjnego. Metoda niesymetrycznego zasilania nie wymaga dodatkowego silnika napędowego i do wyznaczenia strat dodatkowych obciążeniowych wystarczająco jedynie pomiary wielkości elektrycznych, które mogą być wyznaczone ze stosunkowo dobrą dokładnością. Z tych względów metoda ta jest wygodniejsza do zastosowania w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Uwzględniono zmodyfikowany sposób pomiarowego określenia wielkości koniecznych do wyznaczenia strat dodatkowych, przy zastosowaniu cyfrowego miernika kąta przesunięć fazowych. Zamieszczono wyniki badań strat dodatkowych wybranych silników indukcyjnych i przeprowadzono porównanie z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu metody przeciwpoła.

1. Wprowadzenie

Szybki rozwój konstrukcji maszyn indukcyjnych, wynikający ze stosowania nowych materiałów i technologii, spowodował znaczne zmniejszenie masy silników przy jednoczesnym wzroście stopnia wykorzystania obwodu elektromagnetycznego maszyny. Spowodowało to, że straty dodatkowe w nowych konstrukcjach maszyn zaczęły wzrastać powyżej wartości określonych przez normę (0,5% mocy znamionowej wg PN-72/E-06000) dochodząc nawet do kilku procent. Wzrost strat dodatkowych spowodował zmniejszenie sprawności silników, przy jednoczesnym wzroście przyrostów temperatury poszczególnych elementów maszyny. Z tych powodów zagadnienie strat dodatkowych nabrało znaczenia zarówno w aspekcie badań teoretycznych, jak i doświadczalnych.

W celu wyznaczenia strat dodatkowych obciążeniowych w silnikach indukcyjnych klatkowych i pierścieniowych stosowane są najczęściej ze względów praktycznych następujące metody pomiarowe:

- metoda zwarcia synchronicznego,
- metoda przeciwpoła,
- metoda niesymetrycznego zasilania.

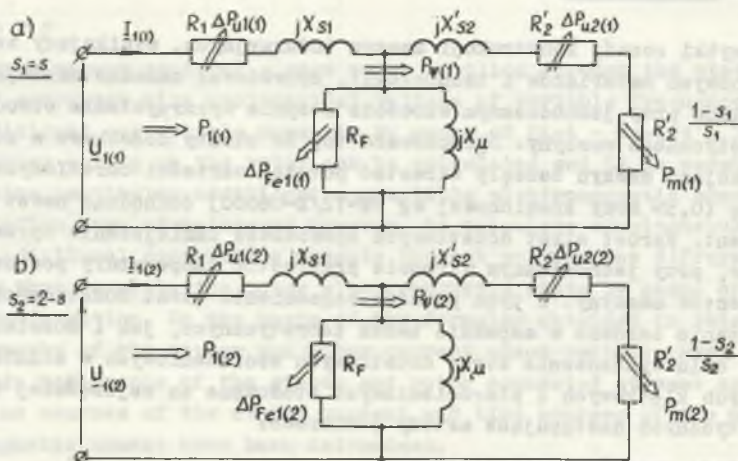
Metody zwarcia synchronicznego i przeciwpola wymagają stosowania dodatkowego silnika napędzającego oraz dokładnego pomiaru mocy na wale silnika napędzającego.

Metoda niesymetrycznego zasilania nie wymaga stosowania dodatkowego silnika napędzającego, pomiary przeprowadza się na biegu jałowym silnika i z tych względów metoda ta wydaje się wygodniejsza do zastosowania zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych, np. na stacji prób.

W artykule przedstawiono zmodyfikowaną metodę pomiaru strat dodatkowych obciążeniowych przy wykorzystaniu niesymetrycznego zasilania nieobciążonego silnika indukcyjnego. Metoda ta zaproponowana w pracy [3] w niewielkim dotychczas stopniu była wykorzystywana w pomiarach, ustępując miejsca metodzie przeciwpola stanowiącej w niektórych krajach podstawę pomiaru strat dodatkowych obciążeniowych (ujętej w normie). Wyniki pomiarów przeprowadzone na trzech silnikach o mocy: 4, 14, 15 kW porównano z wynikami pomiarów przy zastosowaniu metody przeciwpola.

2. Metoda niesymetrycznego zasilania stojana

Pracę ustaloną silnika indukcyjnego zasilanego niesymetrycznym napięciem można analizować metodą składowych symetrycznych. Zgodnie z tą metodą praca silnika niesymetrycznie zasilanego jest równoważna pracy na wspólny wał dwóch identycznych silników indukcyjnych przeciwbieżnych. Na rys. 1 przedstawiono schematy silnika dla składowej zgodnej i przeciwnej.



Rys. 1. Schematy zastępcze silnika indukcyjnego dla składowej zgodnej (a) i przeciwnej (b)

Fig. 1. Equivalent diagrams of induction motor for positive - sequence (a) and negative - sequence (b) components

Sposób wyznaczania strat dodatkowych obciążeniowych opiera się na założeniu, iż pokrywane są one z mocy mechanicznej. Moce mechaniczne dla składowej zgodnej $P_m(1)$ i przeciwnej $P_m(2)$ są określone przez zależności:

$$P_m(1) = P_{u\dot{z}}(1) + \Delta P_m(1) + \Delta P_d(1) \quad (1)$$

$$P_m(2) = P_{u\dot{z}}(2) + \Delta P_m(2) + \Delta P_d(2) \quad (2)$$

gdzie:

- $P_{u\dot{z}}(1)$, $P_{u\dot{z}}(2)$ - moce użyteczne (na wale),
 $\Delta P_m(1)$, $\Delta P_m(2)$ - straty mechaniczne,
 $\Delta P_d(1)$, $\Delta P_d(2)$ - straty dodatkowe obciążeniowe.

Indeksami (1) i (2) oznaczono wielkości dla składowej zgodnej i przeciwnej.

$$P_m(1) = P_\Psi(1) - \Delta P_{u2}(1) = P_\Psi(1)(1-s) \quad (3)$$

$$P_m(2) = P_\Psi(2) - \Delta P_{u2}(2) = -P_\Psi(2)(1-s) \quad (4)$$

gdzie:

- $P_\Psi(1)$, $P_\Psi(2)$ - moce pól wirujących,
 $\Delta P_{u2}(1)$, $\Delta P_{u2}(2)$ - straty w uzwojeniach wirnika,

$$\Delta P_{u2}(1) = P_\Psi(1)s, \quad \Delta P_{u2}(2) = P_\Psi(2)(2-s).$$

Porównując ze sobą moce mechaniczne silnika otrzymane przez sumowanie równań (1) i (2) oraz (3) i (4) otrzymuje się straty dodatkowe obciążeniowe ΔP_d :

$$P_m = P_m(1) + P_m(2) = P_{u\dot{z}}(1) + P_{u\dot{z}}(2) + \Delta P_m(1) + \Delta P_m(2) + \Delta P_d(1) + \Delta P_d(2)$$

$$P_m = (1-s)(P_\Psi(1) - P_\Psi(2))$$

$$\Delta P_d = \Delta P_d(1) + \Delta P_d(2) = (1-s)(P_\Psi(1) - P_\Psi(2)) - \Delta P_m \quad (5)$$

gdzie:

$$P_{u\dot{z}} = P_{u\dot{z}(1)} + P_{u\dot{z}(2)} = 0 \quad - \text{moc użyteczna nieobciążonego silnika,}$$

$$\Delta P_m = \Delta P_{m(1)} + \Delta P_{m(2)} \quad - \text{straty mechaniczne.}$$

Aby otrzymać straty dodatkowe silnika indukcyjnego przy symetrycznym zasilaniu i przy obciążeniu znamionowym ΔP_{dn} , należy przeliczyć wyznaczone w powyższy sposób straty dodatkowe ΔP_d przyjmując, że zależą one w przybliżeniu od kwadratu prądu stojana:

$$\Delta P_{d(1)} = \Delta P_{dn} \left(\frac{I_1(1)}{I_{1n}} \right)^2$$

$$\Delta P_{d(2)} = \Delta P_{dn} \left(\frac{I_1(2)}{I_{1n}} \right)^2$$

$$\Delta P_d = \Delta P_{d(1)} + \Delta P_{d(2)} = \Delta P_{dn} \frac{I_1(1) + I_1(2)}{I_{1n}^2}$$

stąd:

$$\Delta P_{dn} = \Delta P_d \frac{I_{1n}^2}{I_1^2(1) + I_1^2(2)} \quad (6)$$

przy czym

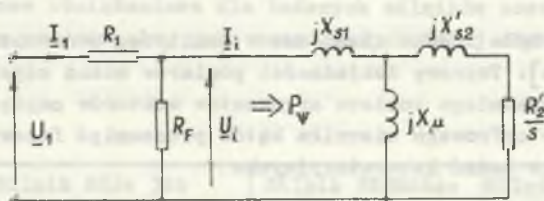
I_{1n} - prąd znamionowy silnika,

$I_1(1), I_1(2)$ - składowe symetryczne prądu stojana.

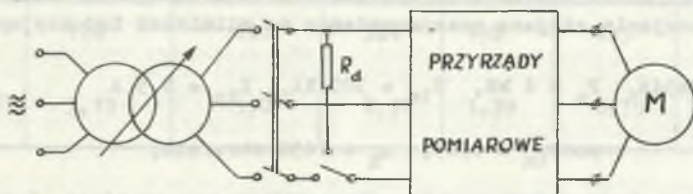
Moce pól wirujących $P_\Psi(1), P_\Psi(2)$ można obliczyć na podstawie schematów zastępczych silnika dla składowych symetrycznych (rys. 1). Prostsze wyrażenia dla tych mocy można otrzymać na podstawie zmodyfikowanego schematu zastępczego [3], w którym rezystancja reprezentująca straty w rdzeniu jest włączona przed reaktancją rozproszenia stojana (rys. 2). Równocześnie zbędna staje się wówczas znajomość wszystkich parametrów schematu zastępczego (wystarczy znajomość rezystancji R_1 oraz R_F).

Moce pól wirujących wynoszą:

$$P_\Psi(1) = 3 \operatorname{Re} \left\{ \underline{U}_1(1) \underline{I}_1^*(1) \right\}, \quad P_\Psi(2) = 3 \operatorname{Re} \left\{ \underline{U}_1(2) \underline{I}_1^*(2) \right\}. \quad (7)$$



Rys. 2. Zmodyfikowany schemat zastępczy silnika indukcyjnego
Fig. 2. Modified equivalent diagram of induction motor



Rys. 3. Układ do pomiaru strat dodatkowych obciążeniowych metodą niesymetrycznego zasilania uzwojenia stojana

Fig. 3. Circuit for measuring stray - load losses using the method of stator winding asymmetrical supply

Potrzebne do wyznaczenia tych mocy, napięcia i prądy stojana dla składowych symetrycznych otrzymuje się przez rozkład na składowe symetryczne niesymetrycznego układu napięć i prądów stojana. Z równań (5), (6), (7) wynika, że do obliczenia strat dodatkowych obciążeniowych silnika należy wyznaczyć pomiarowo:

- poślizg silnika,
- straty mechaniczne,
- wektory napięć i prądów fazowych stojana

dla silnika nieobciążonego, zasilanego niesymetrycznym układem napięć stojana.

Układ pomiarowy, zaproponowany w pracy [3] przedstawiono na rys. 3.

Po rozruchu silnika zasilanego napięciem symetrycznym następuje przełączenie jednej fazy na dodatkową rezystancję R_d . Przyjęty rodzaj niesymetrii umożliwia w prosty sposób wyznaczenie przesunięć fazowych między napięciami i prądami za pomocą watomierzy. Wartości skuteczne prądów i napięć fazowych można zmierzyć woltmierzami i amperomierzami elektromagnetycznymi. Straty mechaniczne wyznacza się przy biegu jałowym silnika.

Pomiary strat dodatkowych opisanym wyżej sposobem dla silników o różnej mocy i dla różnych wartości rezystancji R_d wykazały duży wpływ dokładności pomiarowego wyznaczania wektorów napięć i prądów na wartość strat dodatkowych. Z tego powodu metoda niesymetrycznego zasilania, mimo

swoich zalet, była rzadko stosowana w praktyce, zwłaszcza dla silników dużych mocy [4]. Poprawę dokładności pomiarów można uzyskać przez zastosowanie bezpośredniego pomiaru argumentów wektorów napięć i prądów fazowych za pomocą cyfrowego miernika kątów przesunięć fazowych, co stwierdzono w trakcie badań laboratoryjnych.

3. Badania

Pomiary strat dodatkowych obciążeniowych metoda niesymetrycznego zasilania uzwojenia stojana przeprowadzono na silnikach indukcyjnych:

1) SZJe34b, $P_n = 4 \text{ kW}$, $U_{1n} = 380 \text{ V}$, $I_{1n} = 8,5 \text{ A}$

$$\cos\varphi_{1n} = 0,85, \quad n_n = 1430 \text{ obr./min},$$

2) SZDm64c, $P_n = 14 \text{ kW}$, $U_{1n} = 380 \text{ V}$, $I_{1n} = 27,5 \text{ A}$

$$\cos\varphi_{1n} = 0,87, \quad n_n = 1460 \text{ obr./min},$$

3) Sf160 L-4, $P_n = 15 \text{ kW}$, $U_{1n} = 380 \text{ V}$, $I_{1n} = 29,8 \text{ A}$

$$\cos\varphi_{1n} = 0,85, \quad n_n = 1470 \text{ obr./min}.$$

Do wyznaczenia strat dodatkowych obciążeniowych metodą niesymetrycznego zasilania konieczna jest znajomość wektorowych wartości prądów i napięć fazowych (pkt. 2). Wartości te zostały określone przy wykorzystaniu cyfrowego miernika kąta przesunięcia fazowego.

Pomiary strat dodatkowych obciążeniowych wykonano przy trzech wartościach rezystancji dodatkowej R_d włączonej do obwodu stojana poszczególnych silników.

Uzyskane wyniki pomiarów zamieszczono w tabelicy 1.

Tabela 1

Wielkości pomiarowe	Pomiar	Silnik SZJe 34b $P_n = 4 \text{ kW}$			Silnik SZDm64c $P_n = 14 \text{ kW}$			Silnik Sf160L-4 $P_n = 15 \text{ kW}$		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III
R_d	(Ω)	10,9	8,55	4,2	18,1	9,3	5,1	18,3	10,2	4,3
ΔP_{dn}	(W)	115	130	133	305	324	343	109	112	116
$\frac{\Delta P_{dn}}{P_n} 100$	(%)	2,86	3,25	3,32	2,18	2,31	2,45	0,73	0,75	0,77

Straty dodatkowe obciążeniowe dla badanych silników zostały również wyznaczone metodą przeciwpoła, jako metodą najczęściej stosowaną i zalecaną.

Tablica 2

Straty dodatkowe obciążeniowe	Silnik SZJe 34b $P_n = 4 \text{ kW}$		Silnik SZDm64e $P_n = 14 \text{ kW}$		Silnik Sf160 L-4 $P_n = 15 \text{ kW}$	
	metoda niesym. zasilan.	metoda przeciwpoła	metoda niesym. zasilan.	metoda przeciwpoła	metoda niesym. zasilan.	metoda przeciwpoła
ΔP_{dn} (W)	126	120	324	195	113	140
$\frac{\Delta P_{dn}}{P_n} 100(\%)$	3,15	3,0	2,31	1,39	0,75	0,93

W tablicy 2 zamieszczono wyniki pomiaru strat dodatkowych obciążeniowych badanych silników metodą przeciwpoła i metodą niesymetrycznego zasilania, przy czym dla metody niesymetrycznego zasilania do celów porównywania wzięto wynik średni z uzyskanych pomiarów przy różnych wartościach rezystancji dodatkowej.

4. Uwagi końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań strat dodatkowych obciążeniowych wybranych silników indukcyjnych metodą niesymetrycznego zasilania uzwojenia można stwierdzić, że:

- metoda jest pomiarowo łatwa do wykonania, wymaga jednak pewnego nakładu czasu na obliczenia, które można w sposób zasadniczy skrócić wykorzystując technikę mikrokomputerową,
- wyznaczenie wartości wektorowych napięć i prądów fazowych, reprezentowanych dla przedstawionej metody na podstawie bezpośredniego pomiaru kątów przesunięcia fazowego, w sposób istotny skraca czas opracowania wyników pomiarowych,
- uzyskiwany wynik pomiaru strat zależy od wartości rezystancji dodatkowej włączonej do uzwojenia stojana, czyli od stopnia wprowadzonej niesymetrii zasilania i celowe jest przeprowadzenie analizy wpływu wartości rezystancji dodatkowej na wartość strat dodatkowych obciążeniowych dla danego silnika,
- z porównania wyznaczonych strat dodatkowych obciążeniowych metodą niesymetrycznego zasilania i metodą przeciwpoła wynika, że wyznaczone wartości strat są zbliżone do siebie, zatem zastosowanie danej metody dla zakresu mocy badanych silników jest alternatywne,

- uzyskane wyniki pomiarów strat dodatkowych obciążeniowych obydwoma zastosowanymi metodami są wyższe od wartości podawanych strat dodatkowych przez normę PN-72/E-06000, jaką należy przyjmować przy wyznaczaniu sprawności silnika metodą strat poszczególnych.

LITERATURA

- [1] Gancew I.W.: Dobawocznyje potieri w asinchronnych dwigatielach. Energoizdat, Moskwa 1981.
- [2] Heller B., Hamata V.: Harmonic field effects in induction machines. Academia, Publishing House of Czechoslovak, Praque 1977.
- [3] Jordan H., Richter E., Röder G.: Ein einfaches Verfahren zur Messung der Zusatzverluste in Asynchronmaschinen. ETZ-A, 1967, Bd 88, H.23.
- [4] Kron A., Pfau D.: Beitrag zur Kenntnis der Zusatzverluste grosser Asynchronmotoren. ETZ-A, 1969, Bd 90, H.21.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Ernest Mendrela

Wpłynęło do redakcji dnia 10 czerwca 1987 r.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НЕСИММЕТРИЧНОГО ПИТАНИЯ СТАТОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ДОБАВОЧНЫХ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Р е з ю м е

Рассмотрен метод измерения нагрузочных добавочных потерь при использовании несимметричного питания асинхронного двигателя. Метод несимметричного питания не требует добавочного приводного двигателя и для определения добавочных потерь достаточны только измерения электрических величин, которые могут быть определены с относительно хорошей точностью. По этим причинам этот метод более удобен для использования в лабораторных и промышленных условиях. Учтен модифицированный способ измерительного нахождения величин необходимых для определения добавочных потерь с использованием цифрового измерительного прибора для измерения фазового угла. Приведены результаты испытаний добавочных потерь избранных асинхронных двигателей и сделано сравнение с результатами, которые получены методом противовращения.

APPLICATION OF ASYMETRICAL SUPPLY METHOD TO DETERMINATION OF ADDITIONAL STRAY - LOAD LOSSES IN INDUCTION MOTOR

S u m m a r y

The method of measuring the stray load losses by using asymmetrical supply of the induction motor has been presented. This method does not require additional driving motor and for determining stray-load losses the measurements of electronic quantities which can be determined with relatively good accuracy are sufficient. Because of these reasons this method is more convenient for application under laboratory and industrial conditions. A modified method of measurement determination of the quantities necessary to determine the stray losses with the use of phase displacement angle digital measuring instrument has been taken into account. The results of the tests on stray losses of the chosen induction motors have been inserted and comparison have been carried out with the results obtained by using the reverse-rotation test method.